ZUR FEINSTRUKTUR DES KNOCHENS:

RASTERELEKTRONENMIKROSKOPISCHE UNTERSUCHUNGEN IM BEREICH DES FORAMEN MANDIBULAE BEIM MENSCHEN

K. R. Sattler

Bonn 1976

ZUR FEINSTRUKTUR DES KNOCHENS:

RASTERELEKTRONENMIKROSKOPISCHE UNTERSUCHUNGEN IM BEREICH DES FORAMEN MANDIBULAE BEIM MENSCHEN

ZUR FEINSTRUKTUR DES KNOCHENS:

RASTERELEKTRONENMIKROSKOPISCHE UNTERSUCHUNGEN IM BEREICH DES FORAMEN MANDIBULAE BEIM MENSCHEN

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Hohen Medizinischen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
zu Bonn

vorgelegt von
KARL-LUDWIG SATTLER
aus Mannheim

Bonn 1976

Angefertigt mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Universität Bonn

1. Gutachter: Professor Dr. Dr. E. Lautenbach
2. Gutachter: Professor Dr. G. Schmuth

Tag der mündlichen Prüfung: 26. Mai 1976

Aus der Zahn- Mund- und Kieferklinik der Städtischen
Krankenanstalten Karlsruhe
Direktor Professor Dr. Dr. E. Lautenbach

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Inhaltsverzeichnis

A Einleitung

B Allgemeiner Teil

a) Möglichkeiten der Mikroskopie - das Raster-Elektronenmikroskop

b) Übersicht über bisherige Methoden der Knochenmazeration

c) Kritik und Würdigung der bisherigen Methoden

C Eigene Untersuchungen

1) Präparation des Untersuchungsobjektes

a) Vorüberlegungen

b) Erprobung der Präparationsmethode im Vorversuch

c) Präparation des endgültigen Untersuchungsobjektes

2) Untersuchungsergebnisse

a) Die äußere Gestalt des foramen mandibulae

b) Auswertung der Raster-Elektronen-Mikroskop-Aufnahmen

Raster-Elektronenmikroskop-Aufnahmen

D Schlußbetrachtung

E Anhang

F Literaturverzeichnis

G Lebenslauf

A Einleitung

Schon lange haben die Anatomen die Einzelheiten des menschlichen Körpers untersucht und beschrieben. Ihr Interesse richtete sich dabei auch immer schon auf dessen knöchernen Anteil, der sich augenfällig von den Weichgeweben unterscheidet. Grundlegende Aussagen über den Bau des Knochengewebes wurden erstmals seit der Mitte des vorigen Jahrhunderts gemacht, zum Beispiel von Sharpey, Kölliker, Tomes, Gebhardt und Koltze.

Alle diese Autoren befaßten sich jedoch immer nur mit der Knochenstruktur im Allgemeinen. Wenige, wie Kirsch oder Fischer, schenkten diesem besonderen Gebilde "Mandibularkanal" ihre Aufmerksamkeit. Zu diesem Vergleichbares findet sich sonst im menschlichen Skelett nicht.

Den Feinbau des Knochens im Bereich des foramen mandibulae[1)] zu untersuchen, ist die Aufgabe dieser Arbeit.

Bis in die jüngste Zeit standen der Forschung keine anderen Hilfsmittel zur Verfügung als diejenigen, die man auch in früherer Zeit zur Verfügung hatte, zum Beispiel das Lichtmikroskop.

Objekte wie das Knochengewebe offenbaren ihren feineren Bau erst in der räumlichen Betrachtung vollständig. Das Elektronenmikroskop - schon seit vielen Jahren im Gebrauch - erwies sich als nicht ideales Untersuchungsgerät. Es erfordert eine komplizierte Vorbereitung der Untersuchungsobjekte und liefert Bilder, deren Tiefenschärfe hier nicht zufriedenstellt.

Nunmehr kann Knochensubstanz mit dem Raster-Elektronenmikroskop

untersucht werden, und man erhält Bilder von unvergleichlich großer Raumtiefe.

Zur Untersuchung der Knochenstruktur erfordert das Raster-Elektronenmikroskop im wesentlichen nur eine vorbereitende Maßnahme: die Entfernung des organischen Gewebeanteils. Die Anzahl der in der Literatur für diese Aufgabe angegebenen Methoden zeigt jedoch, daß noch keine allgemein befriedigende Technik gefunden werden konnte.

In der hier vorliegenden Arbeit wird nun nach einer bislang nicht gebräuchlichen Methode vorgegangen. Die organischen Bestandteile des zu untersuchenden Knochens werden durch Enzyme verdaut. Diese fermentative Bearbeitung erweist sich als äußerst schonend, weil dadurch die Knochenfeinstruktur in ihrem Ursprung erhalten bleibt.

Objekt der Untersuchungen war der Unterkiefer einer 68-jährigen Frau, die an einem Abdominaltumor gestorben war.

B Allgemeiner Teil

a) Möglichkeiten der Mikroskopie - das Raster-Elektronenmikroskop

Die Untersuchung eines biologischen Objektes - wie es zum Beispiel der Knochen darstellt - auf seine feineren Strukturen ist an die Verwendung eines Mikroskops gebunden. Grundsätzlich unterscheidet man heute nachfolgend beschriebene Arten:

1.) das schon lange bekannte Lichtmikroskop mit einigen, seine Leistung und Anwendungsbereiche steigernden Verbesserungen, die zum Teil erst in den letzten Jahren entwickelt wurden. Es gestattet Vergrößerungen bis ungefähr 1:2000; die gerade für unsere Zwecke bedeutungsvolle Tiefenschärfe ist bei hoher Auflösung jedoch äußerst gering.

2.) Eine weitere Möglichkeit stellt das Elektronenmikroskop dar, bei dem Objekte von einem Elektronenstrahl quasioptisch durchstrahlt werden. Die Forderung nach ultradünnen Schnitten und die Beständigkeit des Objektes im Hochvakuum erfordern eine umfangreiche, komplizierte Präparation.

Die räumliche Erfassung von Objekten ist besser als beim Lichtmikroskop, die Abbildung einer Oberfläche gelingt freilich nur über den Umweg von Replicas. Elektronenmikroskope erfordern eine Schnittdicke von höchstens 1/10 µ, auch für die Betrachtung von Oberflächen. Da sich solch dünne Knochenschnitte nicht anfertigen lassen, werden Replicas benutzt. KELLENBERGER und ROUILLER[2] (Die Knochenstruktur, untersucht mit dem Elektronenmikroskop, Schweizerische Zeitschr. all.

Path. 13 (1950), Seite 783-788) geben folgende Replicatechnik an:

"Bei diesem Verfahren ersetzen wir die zu untersuchende Oberfläche - und nur darauf kann sich die Untersuchung in diesem Fall erstrecken - durch eine dünne Haut, die genau ihre Form angenommen hat. Dieser dünne Film ist fein genug, um im Elektronenmikroskop beobachtet werden zu können.

Die Art, wie wir dazu gelangen ist verschieden. Da wäre zunächst das sog. positive Verfahren, bei dem zuerst ein dicker Abdruck in plastischem Material hergestellt wird. Dazu wird die zu untersuchende Oberfläche mit Azeton benetzt und darauf eine ca. 0,3 mm dicke Celluloidplatte angedrückt (5). Diese Platte, die einen ersten negativen Abdruck darstellt, wird nach dem Verdunsten des Azetons abgezogen und im Vakuum mit Quarz oder Silicium-Monoxid bedampft. Anschließend wird sie ihrerseits mit einem geeigneten Lösungsmittel weggelöst, und es bleibt der endgültige positive Abdruck in Form einer feinen Quarzhaut von ca. 250 Å Dicke. In den meisten Fällen wird man diese Haut noch mit Metall schräg bedampfen (6), um die Reliefwirkung zu erhalten und die Kontraste zu erhöhen."

3.) In jüngster Zeit erst wurde das Elektronen-Emissions-Mikroskop entwickelt. Hier wird das ganze Objekt, zum Beispiel durch Erhitzung oder durch Beschuß mit Ionen, zur Aussendung von Elektronen angeregt, mit denen man dann ein Bild des Objektes erzeugt.

4.) Das hier verwendete RASTER-ELEKTRONEN-MIKROSKOP basiert auf einem, dem Fernsehen ähnlichen Prinzip: der Abtastung mit einem Elektronenstrahl.

Während bei Fernsehkameras mit Hilfe von Linsen optisch erzeugte Bilder abgerastert werden, tastet beim Raster-Elek-

tronenmikroskop ein äußerst fein gebündelter Elektronenstrahl (Durchmesser ca. 100 Å) das Objekt direkt ab. Sein Auftreffen auf die Objektoberfläche bewirkt den Austritt von "Sekundärelektronen". Synchron mit dem Abtaststrahl läuft ein Schreibstrahl in einer Bildröhre. Die austretenden "Sekundärelektronen" werden von einem Schirm aufgefangen und steuern mit ihrer Stromstärke die Helligkeit des Schreibstrahles (SEILER, LENZ[3]).

Zur richtigen Interpretation der gewonnenen Bilder ist die Kenntnis einiger Besonderheiten erforderlich (PFEFFERKORN und BLASCHKE[4]):

a) Die Zahl der erzeugten "Sekundärelektronen" und damit die Bildhelligkeit in einem bestimmten Punkt hängt überwiegend ab vom Neigungswinkel des Objektes zum Primärelektronenstrahl in diesem Punkt. Je flacher die Primärelektronen auftreffen, desto mehr "Sekundärelektronen" werden erzeugt.

b) Die Lage des Objektes zum Elektronenauffangschirm bewirkt, daß von den dem Schirm zugewandten Bereichen mehr Elektronen aufgefangen werden, als von den abgewandten. Es entsteht hierdurch der Eindruck, das Objekt sei aus der Richtung des Schirmes beleuchtet.

c) Vom Objekt zurückgestreute Elektronen des Primärstrahles können gleichfalls der Bilderzeugung dienen. Sie erlauben unter Umständen die Differenzierung stofflicher Unterschiede ("Materialkontrast"). Für die hier vorgenommene Untersuchung ist dies nicht von Bedeutung.

d) Bei der Abbildung dünner Strukturen tritt ein sogenannter "Kanten(aufhellungs)effekt" ein. Er kommt dadurch zustande, daß in die Tiefe eindringende Primärelektronen die Aussendung von "Sekundärelektronen" auch an anderen, nicht direkt vom Primärstrahl getroffenen Außenflächen bewirken.

e) Bildstörungen in Form eines örtlich begrenzten, starken Anstiegs der Bildhelligkeit kommen durch ungenügende Leitfähigkeit und elektrostatische Aufladungen des Objektes zustande. Mit den von D. KAMMERER vorgeschlagenen Antistatika wird also, wie man inzwischen weiß, nicht der Kanteneffekt beeinflußt, sondern die - allerdings besonders an Kanten etc. auftretenden - Aufladungserscheinungen.

f) Die Bedampfung des Objektes mit einer Leitschicht hat den Zweck, die von ihm absorbierten Elektronen abzuleiten. Hierzu dient in unserem Falle Gold, da es eine hohe Ausbeute an "Sekundärelektronen"gewährleistet. Um bei der Bedampfung das Eindringen des Golddampfes in abgeschirmte Bereiche zu verbessern, wurde die Behandlung mit Osmiumsäure vorgenommen (mündliche Angabe von RICHTER[5]).

b) Übersicht über bisherige Methoden
der Knochenmazeration

Neben dem Hauptziel, den Feinbau des Knochens im Bereich des foramen mandibulae aufzuzeigen, stand bei dieser Arbeit eine andere Frage zur Diskussion: Für eine Betrachtung im Raster-Elektronenmikroskop bedarf es einer besonderen Aufbereitung jeglichen organismischen Materials, so auch des Knochens. Ziel des Bemühens ist es immer, den organischen Gewebeanteil auszulösen, ohne die Struktur des Knochens zu zerstören und ohne Artefakte zu erzeugen. Die Zahl der Möglichkeiten, die von verschiedenen Autoren angegeben werden, läßt erkennen, daß bisher noch keine Ideallösung gefunden werden konnte.

So wird zum Beispiel von LINDENFELSER[6] et al. angegeben, man solle den Knochen in Formalin 5% fixieren, dann mit Äther entfetten und schließlich in Kalilauge 0,5% zwanzig Minuten lang kochen. Danach werden die Objekte entwässert und anschließend mit Gold bedampft.

D. KAMMERER[7] benutzte folgende Methode: Das Untersuchungsobjekt wird in Wasserstoffperoxid ausgespült, dann in Pufferlösung gebracht, in Glutaraldehyd 24 Stunden lang fixiert, wieder in Pufferlösung gelegt, dann in der aufsteigenden Alkoholreihe entwässert, mit Perchloräthylen während zweier Stunden bei 120 Grad Celsius entfettet und anschließend bedampft. Es wurde hier außerdem der Versuch unternommen, das Auftreten des sogenannten Kanteneffektes (Beschreibung an anderer Stelle) durch eine besondere antistatische Behandlung zu dämpfen, beziehungsweise zu verhindern. Hierzu wurden im Spezialhandel erhältliche Substanzen benutzt. Materialien und Methode brauchen hier keine weitere Erörterung zu finden.

B. LESSMEISTER[8] beschreibt den Vorgang folgendermaßen: zuerst

Spülung des Objektes in Wasserstoffperoxid, dann in Äther, hierauf in physiologischer Kochsalzlösung und anschließend Fixierung in gepuffertem Glutaraldehyd (12 - 14 Stunden). Darauf erfolgt die Entwässerung in der aufsteigenden Alkoholreihe.

Die Autorin weist darauf hin, daß bei ihrem Vorgehen zahlreiche Fehlschläge eingetreten sind und überlegt, ob eine Verbesserung nicht mit Hilfe biochemischer Methoden zu erreichen sei. Sie verweist auf BOYDE und HOBDELL[9)], deren Verfahren gleichfalls noch dargelegt werden wird.

BECHER[10)] et al. haben sich an einer früher bereits angegebenen Methode von SUNDIUS, BYGDEN und BRUCE[11)] orientiert. Ihr Prinzip ist die Oxidation des organischen Gewebeanteils des bereits entwässerten Objektes durch Wasserstoffperoxid. Das 30%ige Wasserstoffperoxid wird so lange angewandt, bis sich die Lösung nicht mehr trübt. Der Knochen wird vom organischen Gewebeanteil in der Tat so weitgehend befreit, daß er unter Umständen schon bei bloßer Berührung mit der Hand zerfällt. Doch gerade für die Zielsetzung der hier vorliegenden Arbeit muß die Struktur des Knochens gewahrt bleiben, so daß dieses Verfahren nicht anwendbar ist.

LANGE[12)] bediente sich, um den organischen Anteil vom Knochen zu trennen, des in der zahnärztlichen Praxis verwendeten Antiformins. Sein Hauptziel war hierbei allerdings nur die grobe Reinigung des Knochens von organischem Material, da sein Interesse allein der Kontrastverbesserung des von ihm angefertigten Röntgenaufnahmen galt.

BOYDE und HOBDELL lassen ihre Objekte bei Zimmertemperatur trocknen, bis sich das Knochenmark vom Knochen zu lösen beginnt. Das oberflächliche Periost wird so weit wie möglich von der Oberfläche entfernt. Daraufhin erfolgt die Lösung des organischen Gewebeanteils mit 1,2 Aethan-Diamin über mindestens 48 Stunden in

einem Soxhlet-Apparat. Die Wirkung beruht auf der basischen Eigenschaft des Aethan-Diamins.

Bevor man die Objekte mit Gold bedampft, werden sie noch in reinem Alkohol gewaschen.

c) Kritik und Würdigung der bisherigen Methoden

Die Darstellung der Knochenfeinstruktur verlangt eine möglichst vollständige Befreiung des Untersuchungsobjektes von organischen Anteilen, ohne jedoch Artefakte zu erzeugen. Die Anwendung von Wasserstoffperoxid (BECHER) zeigt wohl gute Ergebnisse, birgt jedoch die Gefahr in sich, daß der Knochen - wie bereits erwähnt - schon bei bloßer Berührung zerfällt.

Die Methode, den Knochen in Kalilauge zu kochen (LINDENFELSER), sollte wegen der Möglichkeit des Siedeverzugs innerhalb der feinen Spongiosa nicht benutzt werden. Als Folge hätte man Mikrofrakturen durch den auftretenden hohen Druck.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Vorversuchen wurde ein Versuchsobjekt durch Kochen so beschädigt, daß ein ungefähr 0,007 g schweres Knochenstückchen abplatzte (siehe Diagramm I).

Die nähere Betrachtung der Raster-Elektronenmikroskop-Bilder aus den Dissertationen sowohl von KAMMERER als auch von LESSMEISTER ließ erkennen, daß es dort nicht immer vollständig gelungen war, die organische Matrix von der Knochensubstanz zu trennen.

Die Methode LANGEs dagegen dient einem anderen Ziel. Er beabsichtigte eine grobe Reinigung des Knochens von organischem Material, um bei seinen Röntgenuntersuchungen eine Kontrastverbesserung zu erreichen.

Einer näheren Betrachtung wert ist die Methode von BOYDE und

HOBDELL. Sie zeigt beachtliche und gute Ergebnisse, doch in der hier vorliegenden Arbeit ist der Versuch unternommen worden, eine alternative Methode zu finden und zu erproben.

C Eigene Untersuchungen

1) Präparation des Untersuchungsobjektes

a) Vorüberlegungen

Die Anwendung von Enzymen schien den Forderungen, die für die Aufbereitung der Untersuchungsobjekte zu stellen waren, am ehesten zu entsprechen. Hierbei mußte beachtet werden, daß nur solche Enzyme zur Anwendung kamen, deren Arbeitsbereich im schwach basischen Milieu liegt. Die Entscheidung fiel zunächst auf

Chymotrypsin,

da sein Wirkungsoptimum bei pH 7,3 liegt. Ein nicht unwesentlicher Vorzug liegt in seinem relativ günstigen Preis.

Die Untersuchungsobjekte wurden vom Unterkiefer einer 68-jährigen Frau gewonnen, die an einem Abdominaltumor verstorben war. Die Frau war zahnlos.

Für einen Vorversuch wurden zwei Knochenstücke vom vorderen Teil des arcus mandibulae entfernt.

b) Erprobung der Präparationsmethode
im Vorversuch

Zunächst wurden beide Knochenstücke zur Entfernung grober Verunreinigungen mit Wasser abgespült, dann für einige Minuten zur Beseitigung von Blutresten in 3%iges Wasserstoffperoxid gelegt und dann folgendermaßen behandelt:

Objekt I wurde in ein Enzym-Puffergemisch mit pH 7,3 gebracht, wobei das Enzymgewicht bei jedem Ansatz ungefähr 1/50 des Objektgewichtes ausmachte. Dieses Verhältnis wurde gewählt, weil hierbei eine maximale Wirksamkeit des Enzyms zu erwarten war (mündliche Angabe von HEINRICH[13]). Die Lösung wurde in einem Wärmeschrank bei einer Temperatur von 37 Grad Celsius aufbewahrt; alle drei Tage wurde der Ansatz gewechselt.

Um die Ausbildung örtlich begrenzter chemischer Gleichgewichte auszuschließen, wurden Magnetrührer eingesetzt.

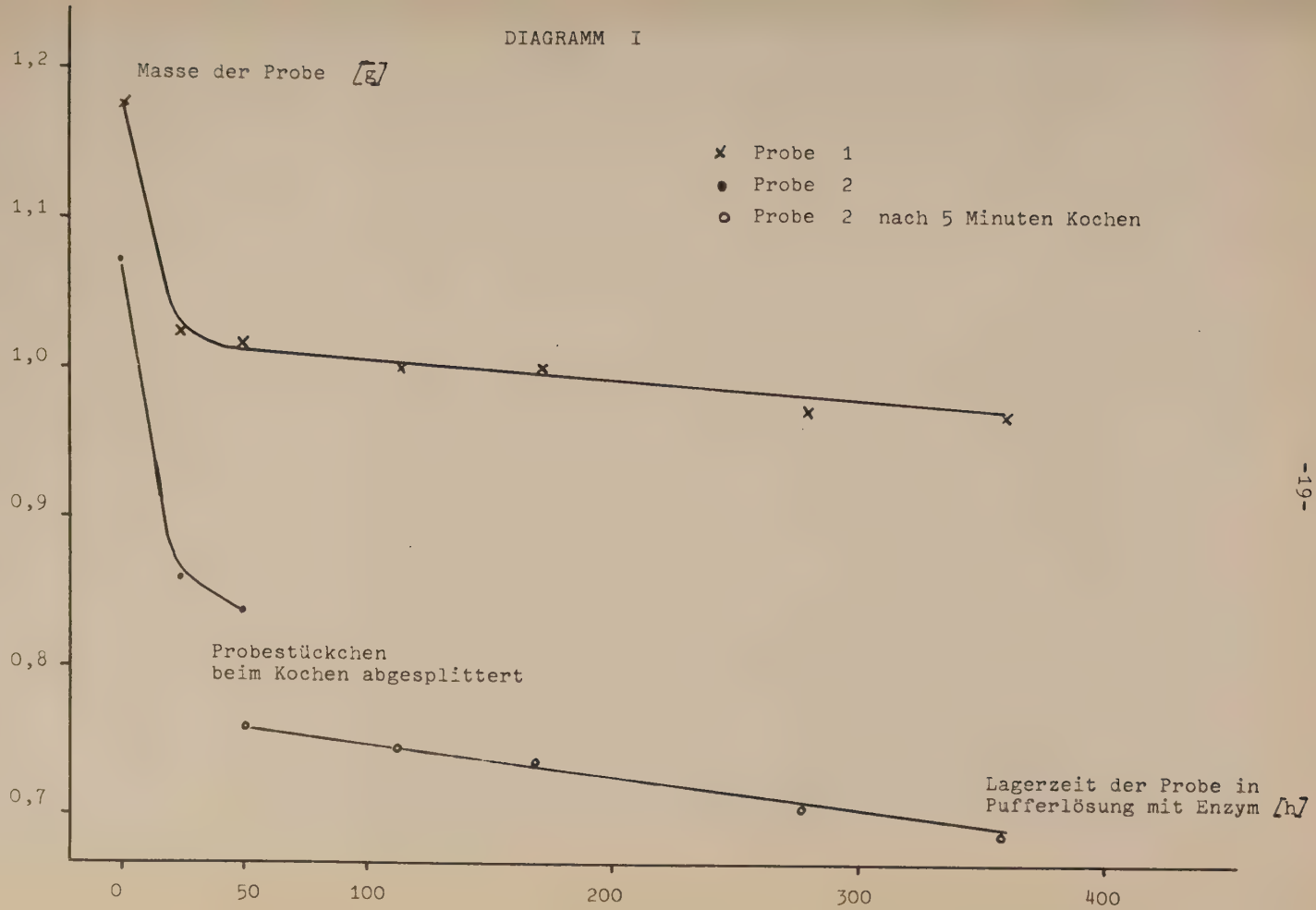
Nach ungefähr 15 Tagen war keine wesentliche Gewichtsabnahme mehr festzustellen, der Versuch wurde daraufhin eingestellt.

Bei Objekt II wurde das gleiche Verfahren angewandt, allerdings mit einem Unterschied, daß nämlich - so der Gedanke - dem Enzym der Angriff durch Denaturierung des Eiweißes erleichtert werden sollte. Dies wurde erreicht durch fünf Minuten langes Erhitzen in aqua dest. auf 75 Grad Celsius vor jedem neuen Ansatz[14]. Es war deutlich festzustellen, daß das Erhitzen nicht nur die enzymatische Wirkung ganz wesentlich verstärkte, sondern auch die Entfettung des Objektes bewirkte.

Das Diagramm I zeigt die Gewichtsabnahme der beiden Objekte. Sie

wurden vor der Betrachtung im Raster-Elektronenmikroskop in aqua dest. ausgespült, im Trockenschrank über Nacht getrocknet und schließlich für einige Stunden über Osmiumsäure gehängt. Dieser letzte Vorgang dient der Verbesserung der Leitfähigkeit[15]. Am Ende stand die Bedampfung mit Gold.

DIAGRAMM I


Masse der Probe [g]
1,2
1,1
1,0
0,9
0,8
0,7
Probe 1
Probe 2
Probe 2 nach 5 Minuten Kochen
Probestückchen
beim Kochen abgesplittert
Lagerzeit der Probe in
Pufferlösung mit Enzym [h]
0
50
100
200
300
400

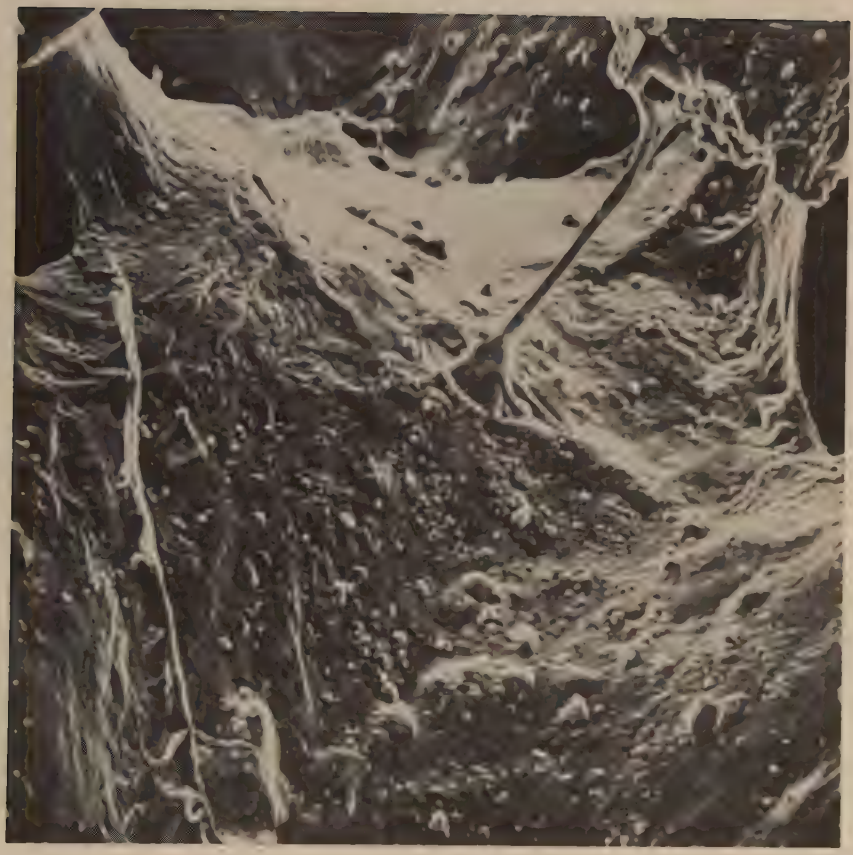
Die folgenden Bilder sollen der Erläuterung des bisher Gesagten dienen:

Bild 2742 zeigt Objekt I. Die nahezu vollständige Bedeckung der Knochenoberfläche mit organischem Material läßt keine Feinstruktur erkennen. Es kann jedoch behauptet werden, daß es sich bei den zahlreichen kleinen, kugelförmigen Gebilden um Fetttropfen handelt.

Bild 2467 wurde von Objekt II angefertigt. Es zeigt die Innenwand des Mandibularkanales, der ungefähr senkrecht zur Bildebene verläuft. Deutlich ist der Verlauf der mineralisierten kollagenen Fasern zu erkennen. Es fällt auf, daß der Knochen hier aus zahlreichen Schichten gebaut ist, in denen die Fasern in unterschiedlichen Richtungen verlaufen. Die größte Zahl derjenigen Fasern, die auch die innerste Schicht darstellen, umläuft den canalis mandibularis ringförmig.

An dem feinen Kanal, der in der Bildmitte zu erkennen ist, sehen wir, daß ein breiter Zug von Fasern sich vor demselben teilt, um sich dahinter wieder vereinigt weiter fortzusetzen. In diesen Kanal hinein weisen wiederum zirkulär verlaufende Züge, die unter der oberflächlichen Schicht der Wand des Mandibularkanales entspringen.

Was bereits bei dieser geringen Vergrößerung auffällt und bei höheren Stufen stark ins Auge springt, sind zahlreiche kleine Partikel von unregelmäßig kugeliger Gestalt. Es handelt sich dabei aller Wahrscheinlichkeit nach um nicht abgebaute Reste organischen Materials, die sich unter fermentativem Einfluß aufgerollt haben und lose der Oberfläche aufsitzen. Die Annahme, es handele sich etwa um Staubpartikel vom Zersägen des Knochenstückes, konnte verworfen werden, da diese Stücke vom Knochen abgebrochen worden sind, nachdem er vorher durch Einlegen in flüssige Kohlensäure tiefgefroren worden war.



Nr. 2472

Mit organischem Material bedeckte Spongiosa aus der Umgebung des Mandibularkanales im mesialen Abschnitt (Objekt I des Vorversuches).
Vergrößerung: 1:100

Nr. 2467

Innenwand des Mandibularkanales im mesialen Abschnitt. Denaturierung der organischen Knochensubstanz durch Erhitzen (Objekt II des Vorversuchs).
Vergrößerung: 1:400

c) Präparation des endgültigen Untersuchungsobjektes

Nachdem die Brauchbarkeit der fermentativen Präparation feststand, wurde das für die Untersuchung benötigte Stück der Mandibula genau wie vorher beschrieben behandelt. Ergänzend wurde außer Chymotrypsin noch Carboxipeptidase benutzt, die bei pH 7,0 ihr Wirkungsoptimum hat. Der genaue Gang der fermentativen Aufbereitung ist aus der nachfolgenden Zusammenstellung zu ersehen.

Versuchsprotokoll

Aufbereitung eines Knochenstückes aus dem Bereich des foramen mandibulae einer 68-jährigen Frau - Todesursache: Abdominaltumor - zur Betrachtung unter dem Raster-Elektronenmikroskop.
Verlauf:

1. Gründliches Waschen unter fließendem Wasser.
2. Einbringen in Wasserstoffperoxid (hauptsächlich zur Entfernung von Blutresten).
3. Erneutes Waschen unter fließendem Wasser.

Diese Punkte dienten der Vorbereitung. Nach diesen vorbereitenden Maßnahmen erfolgt die eigentliche Aufbereitung des Knochens mit Hilfe von Chymotrypsin und danach mit Carboxipeptidase.

Chymotrypsin kommt zur Anwendung in einer Pufferlösung mit pH 7,3. Das Enzymgewicht ist bei jedem Ansatz ungefähr 1/50 des Gewichtes des Knochenstückes, damit die Enzymmenge zu der vermutlich zu verdauenden Eiweißmenge in richtiger Relation steht[16)].

Die Einwirkungszeit der Lösung beträgt jedes Mal drei Tage, wobei der Erlenmeyerkolben verschlossen in einem Thermoschrank (T = 37 Grad Celsius) steht.

Um die Ausbildung örtlich begrenzter chemischer Gleichgewichte zu verhindern, wird der Ansatz durch Magnetrührer in Bewegung gehalten.

In gleicher Weise kommt anschließend Carboxipeptidase zur Anwendung. Carboxipeptidase liegt als Suspension vor; 0,5 ml ent-

sprechen 25 mg.

4. Erhitzen in aqua dest. auf 75 Grad Celsius über fünf Minuten zur Denaturierung.

5. Trocknen im Trockenschrank für zwei Stunden.

6. Einbringen in die Lösung (Chymotrypsin, pH 7,3; 37 Grad Celsius, 3 Tage).

Vorgang 4, 5 und 6 erfolgten zehn mal, das heißt über 30 Tage. Danach konnte keine Gewichtsabnahme mehr festgestellt werden.

Wiederholung mit Carboxipeptidase:

4.a) Erhitzen in aqua dest. auf 75 Grad Celsius über fünf Minuten zur Denaturierung.

5.a) Trocknen im Trockenschrank für zwei Stunden.

6.a) Einbringen in die Lösung (Carboxipeptidase, pH 7,0; 37 Grad Celsius, 3 Tage).

Vorgang 4.a), 5.a) und 6.a) erfolgten vier mal, das heißt über zwölf Tage. Die gesamte Aufbereitung nahm somit 42 Tage in Anspruch.

Bei dieser Aufbereitung zeigt sich, daß die bereits im Zusammenhang mit der Beschreibung des Bildes 2467 erwähnten Auflagerungen auch hier wieder in Erscheinung traten. Sie konnten jedoch auf relativ einfache Art beseitigt werden, indem die Untersuchungsobjekte für fünf Minuten in einen, in der zahnärztlichen Praxis gebräuchlichen Ultraschallreiniger gegeben wurden. Dies zeigt sehr deutlich der Vergleich der Bilder Nr. 12 und Nr. 13[17)].

2) Untersuchungsergebnisse

a) Die äußere Gestalt des foramen mandibulae

Das Untersuchungsobjekt, das zunächst als Ganzes vorlag, wurde in mehrere Teile geteilt, wie sie für die Betrachtung im Raster-Elektronenmikroskop brauchbar sind. Da auch bei der kleinstmöglichen Vergrößerung von 1:20 das Bildfeld relativ klein ist, verliert der Betrachter leicht die Übersicht.

Das Bild Nr.1 gibt eine Vorstellung vom untersuchten Gebiet und erleichtert dem Mikroskopierenden die Orientierung wesentlich. Man kann hier bereits einige Einzelheiten beschreiben:

Beim Menschen liegt das foramen mandibulae an der Innenseite des Unterkiefers, in der Gegend des Kieferwinkels, nahe der hinteren Kante (im Bild die rechte Kante des mit 1 bezeichneten Stückes). Es ist bei verschiedenen Individuen von variierender Größe und Gestalt, jedoch gleichen sich die foramina beim selben Individuum. Das Aussehen hängt weitgehend von demjenigen des nervus alveolaris inferior ab. Ist er eher flach als rund oder dünn, so stellt sich das foramen - anders als im vorliegenden Fall - taschenförmig dar, als flache Einsenkung, von einer ziemlich dünnen Knochenlamelle überdeckt. Der Stärke des Nerven entsprechend haben wir hier jedoch sehr kräftige äußere Konturen. Von der Wand hebt sich eine sehr deutlich zu erkennende Nase ab, um die distale (dorsale) Begrenzung zu bilden. Parabelförmig zieht der Rand des Knochens über den Kanaleingang hinweg. Der Boden weist - anders als die umgebende Kompakta - eine Vielzahl kleiner und kleinster Löcher auf, die sich nur im Bereich dieser Mulde zeigen. Man findet sie ebenso, wenn auch weniger häufig, innerhalb

des Mandibularkanales selbst.

Dieser Befund deckt sich mit der Feststellung von DIECKMANN[18], daß der Mandibularkanal "keineswegs nach allen Seiten abgeschlossen ist, sondern daß überall sehr reichliche, größere und kleinere Kommunikationen mit den umliegenden Markräumen und den Alveolen der Zähne bestehen."

KIRSCH[19] - ebenso wie EVIGUCHI, den er zitiert - stellt fest, daß der Mandibularkanal aus Kompakta gebaut ist.

Das am Eingang des Mandibularkanals abpräparierte Periost war im Gegensatz zum übrigen sehr viel feiner und ließ sich leichter ablösen. Auf dem Übersichtsbild weniger gut zu sehen ist die Lage des canalis mandibularis selbst unmittelbar unter der lingualen Lamelle der Mandibula; ein Befund freilich, der - so haben es die Untersuchungen von KIRSCH gezeigt - bei jedem Individuum verschieden ist.

Außerdem zeigt sich in Bild Nr.1 auf einem Teilstück von Präparat 4 eine Anzahl feiner linienförmiger Impressionen, wovon eine in der Mitte liegende deutlicher ausgeprägt ist. In denselben liegen Blutgefäße, die das Periost durchziehen.

b) Auswertung der Raster-Elektronenmikroskop-
Aufnahmen

Bild Nr.2 (Präparat 3) zeigt in der Aufsicht die Bruchfläche des Mandibularkanales. Rechts befindet sich das Lumen, links Spongiosa.

HERFERT[20] spricht bei der Beschreibung von Röntgenbildern von "spongiosaarmen Markräumen", Aufhellungen, die nicht durch pathologische Ursachen erklärbar sind. Nach seiner Auffassung liegen diese gehäuft im Bereich der Kieferknochen vor. Die Beobachtung von HERFERT mag erklären, warum das Bild nur die Wand des Mandibularkanales zeigt, jedoch keine angrenzenden Strukturen.

In der 200-fachen Vergrößerung sieht man zwei Schichten: rechts eine dünnere, die geordneter im Bau erscheint und eine relativ glatte Bruchfläche aufweist, sodann eine Trennlinie, und im linken Bildteil eine mehr als doppelt so breite Schicht, die im Gegensatz dazu deutlich unregelmäßiger gebaut ist. Dieser Befund ist geeignet, die Behauptung EVIGUCHIs[21] zu unterstützen, die Wand des Mandibularkanales sei aus Kompakta gebaut.

Unter der Voraussetzung, daß der Mechanismus der Entstehung des Mandibularkanales demjenigen des Rückenmarkkanales gleicht oder ähnelt, ist eigentlich kein anderer Befund zu erwarten. Beim Rükkenmark beginnt die Entwicklung durch Einstülpung von der Oberfläche her.

Nach FISCHERs[22] Ansicht gibt es im Grunde kein als Mandibularkanal zu bezeichnendes Gebilde. Er stellt fest, der nervus alveolaris inferior ziehe gleichsam frei durch die Spongiosa des Unterkiefers (" .... stellt überhaupt mehr einen Weg im Unterkiefer

als einen Tunnel dar").

KIRSCH[23)] hat insbesondere die Entwicklung des Mandibularkanales verfolgt. Hierzu wurden Serienschnitte von foetalen Unterkiefern in verschiedenen Altersstufen histologisch untersucht. Bei diesen Arbeiten kommt er zu dem Schluß, daß die Einlagerung des Gefäß-Nerven-Bündels in den Unterkiefer durch Einsenkung von oben her erfolgt. Seine Erkenntnis spricht dafür, daß die Wand des Mandibularkanales aus kompakter Knochensubstanz besteht.

Ein Ausschnitt in 1000-facher Vergrößerung (Bild Nr.3) zeigt einige Details aus der spongiosanahen Zone. Wir sehen im Zentrum des Bildes kurze Fibrillen - parallel verlaufend - umgeben von solchen, die in unterschiedlichen Richtungen laufen und dort, wo sie im Querschnitt getroffen sind, die Bruchzone dieses Knochenstückchens bilden.

Am linken Bildrand eben noch sichtbar ist die Oberfläche, die der Spongiosa zugewandt ist. Entsprechend der Vielzahl kleiner Gefäße, die von hieraus in den Knochen hineinlaufen, erscheint die Oberfläche uneben und vielfach durchbrochen.

Im Gegensatz zur vorigen Aufnahme zeigt Bild Nr.4 bei gleicher Vergrößerung im Bereich des Mandibularkanales (rechts im Bild) Lamellen, die wie die Karten eines Kartenspiels hintereinandergeschichtet sind. Diese breccienartige Struktur unterstreicht die schon vorher gemachte Aussage, die Wand des Mandibularkanales bestehe aus kompaktem Knochen.

Links von der Stufe, die schräg durch die Bildmitte verläuft, liegt entsprechend dem Befund des vorigen Bildes eine Zone ungeordnet verlaufender Fibrillen.

Bild Nr.5 ist eine 10 000-fache Vergrößerung und stammt von der seitlichen Wand des Kanaleinganges (Präparat 4).

Dies ist die einzige Aufnahme dieser Versuchsreihe, die in einer so großen Vergrößerung noch eine scharfe Abbildung erbrachte.

Die Fibrillen verlaufen gleichgerichtet in getrennten Ebenen. Sie sind Ende zu Ende und auch mit feinen Querfasern miteinander verbunden. Ob solche Fasern auch zwischen den Ebenen, senkrecht zur Ebene des Bildes vorhanden sind, läßt sich aus der vorliegenden Aufnahme nicht feststellen. Man kann sich freilich der VON EBNERschen[24)] Ansicht anschließen, daß die Fibrillen nur in zwei Dimensionen vernetzt sind.

Nr.6: Dieses Bild stellt die Übersicht zur vorigen Aufnahme dar. In 2000-facher Vergrößerung sieht man Fibrillen, die in breiten Zügen parallel verlaufen und mit den schon zuvor beschriebenen feinen Fasern verbunden sind. Am unteren Bildrande fällt ein Bereich auf, in dem die Fibrillen sehr eng zusammengeschoben sind: ein Teil einer VON EBNERschen Primärlamelle.

VON EBNER[25] unterscheidet beim Knochen:

1. die Grundsubstanz, zusammengehalten durch Kittmasse; hieraus bestehen die Fibrillen.

2. die Lamellen, gebildet aus Fibrillen, die in zwei Dimensionen vernetzt sind; bilden sie eine dicht gewebte Platte, so nennt er sie "Primärlamellen". Aus einer Vielzahl paralleler "Primärlamellen" entsteht eine "Secundärlamelle", diejenige, aus der der Lamellenknochen seinen Namen herleitet.

3. die Lamellengrenzen, die Orte, an denen Resorption, beziehungsweise Apposition stattfindet.

4. die kollagene Fibrille, die den einzigen konstanten Teil der Knochengrundsubstanz darstellt.

K. TERRAHE et al.[26] beschreiben drei beim Menschen üblicherweise vorkommende Knochenarten:

1. Lamellenknochen als Umkleidung der gefäßführenden Haversschen Kanäle, die er als Lamellenschicht umgibt.

2. Strähnenknochen; gleiche Bauweise, jedoch keine Regelanordnung der kollagenen Fasern.

3. Geflechtknochen

Der amerikanische Autor PRITCHARD[27)] kennt zwei charakteristische Arten des Knochens:

1. "Woven bone", bestehend aus unregelmäßig und ohne erkennbares System verlaufende Faserbündeln.

2. "Lamellar bone", gekennzeichnet durch den gerichteten Verlauf der Fibrillen.

Die Fibrillen - so PRITCHARD - sind röhrenähnlich gebaut: im Inneren Fortsätze der Osteocyten, darum herum eine Schicht kollagener Faserbündel in einer amorphen Grundsubstanz ("cement"), welche von Calciumphosphatkomplexen durchdrungen ist. Das "cement" ist wahrscheinlich ein Protein-Polysaccharidkomplex. Bei keiner der hier vorliegenden Aufnahmen ist es jedoch gelungen, das "Lumen" einer Fibrille darzustellen. Daß diese freilich so gebaut sind, meint auch KNESE[28)]. Ebenso wird dies von BECHER et al.[29)] angegeben.

In Bild Nr.7 ist die Vergrößerung nur noch 500-fach. Man sieht lange Züge von Fibrillen - ein Bild vergleichbar mit einem solchen, wie man es von sichtbar gemachten magnetischen Kraftlinien kennt. Lakunen, die auf Appositions- beziehungsweise Resorptionsvorgänge hinweisen, fehlen hier völlig. Es sind jedoch deutlich zahlreiche kleine Partikel zu sehen, welche auf der Oberfläche liegen. Diese konnten - wie schon erwähnt - mit Ultraschallreiniger entfernt werden.

Das Bild Nr.8 ist weniger bedeutungsvoll im Hinblick auf die Mikrostruktur des Kieferknochens. Es zeigt aber in ausgezeichneter Weise, daß die Enzyme selektiv organische Substanz angreifen. Rechts im Bilde und oben liegen Bereiche, deren Oberfläche glatt ist. Es handelt sich um Überreste organischen Materials. Ob hier ein Zufallsergebnis vorliegt oder ob der organische Teil der Knochensubstanz stark unterschiedlich in seiner chemischen Zusammensetzung ist - somit vielleicht auch in seinen Aufgaben - liegt nicht im Bereich dieser Arbeit und wäre anderweitig zu verfolgen.

Bild Nr.9 ist ein Ausschnitt aus dem Zentrum des vorigen Bildes in 5000-facher Vergrößerung. Er liegt an der Oberkante des Fibrillenbündels, das in Bild Nr.8 in der Bildmitte von links unten nach rechts oben verläuft. Am oberen Ende des Ausschnitts sieht man einen Kanal (Volkmann), der senkrecht die dort liegende Lamellenschicht durchbohrt. In der Tiefe eben noch zu erkennen ist eine Stelle, wo er sich gabelt.

Unmittelbar rechts daneben liegen zwei Fibrillen, die von feinen Fasern zusammengehalten werden, ein Befund, der auch schon bei einer anderen Aufnahme zu sehen war.

Bild Nr. 10: Bei dieser Aufnahme blickt man auf die Innenseite der Mandibula, das heißt auf die lingual liegende Knochenlamelle. Es handelt sich also um kompakten Knochen.

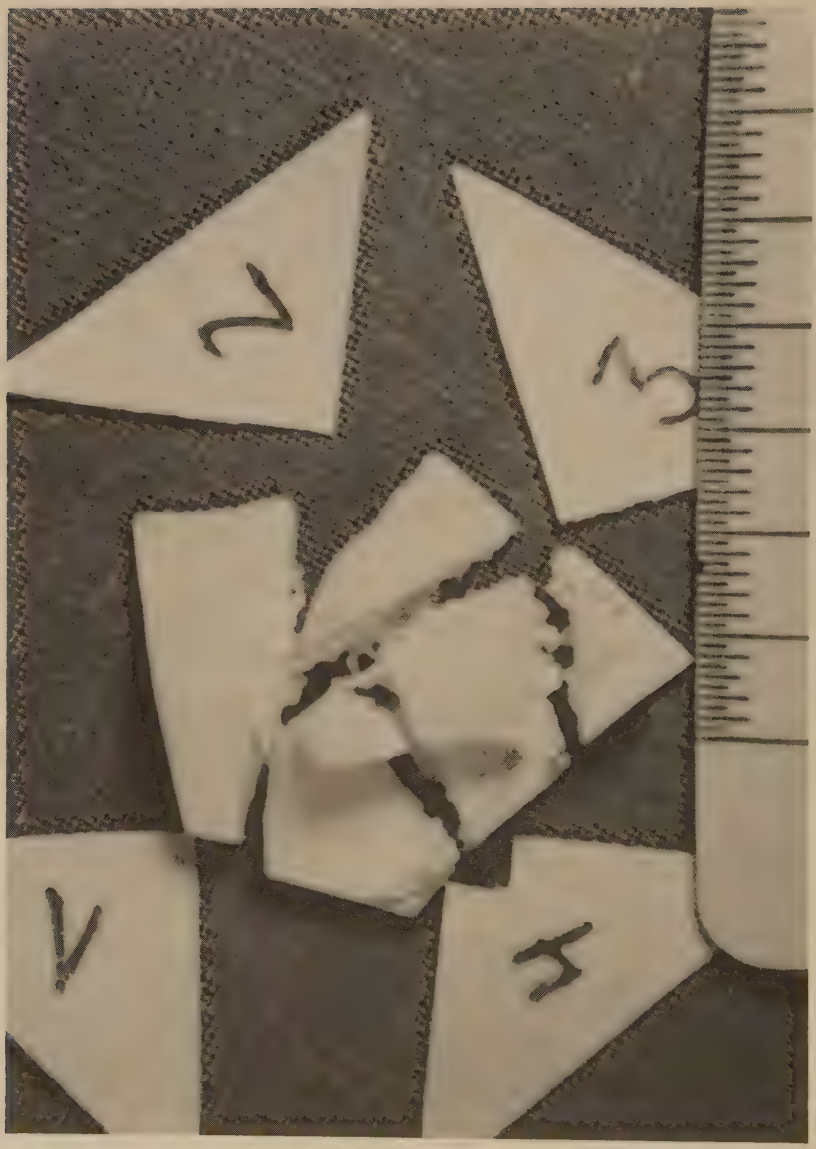
Der Bildausschnitt liegt kurz mesial der Stelle, wo die elliptische Begrenzung des Kanaleinganges ihren tiefsten Punkt erreicht. Diese Übersicht in 200-facher Vergrößerung zeigt eine dichte Oberfläche, besonders deutlich im rechten unteren Teil des Bildes. Die übrigen Anteile sind zwar nicht so ausgeprägt "kompakt", aber dennoch deutlich so dicht gebaut, daß der Eindruck einer zusammenhängenden Fläche entsteht.

Bild Nr. 11: In ähnlicher Weise wie bei der Aufnahme Nr.8 darf hier eine selektive Enzymwirkung vermutet werden: am linken Rande des Bildes, unterhalb der Mitte, ist eine Vertiefung zu erkennen (ein feines Knochenkanälchen?), deren Oberfläche deutlich anders ist, als diejenige in den übrigen Bildanteilen. Hier ist sie nahezu glatt, sonst sichtbare Vernetzungen mit Nachbarfibrillen fehlen, gleichfalls die auch sonst häufig anzutreffenden knolligen Auflagerungen.

Die bis hierher angefertigten Aufnahmen zeigten immer wieder, daß es wohl gelungen war, den organischen Anteil der Knochensubstanz zu entfernen. Aber immer wieder wurden die gewonnenen Ergebnisse durch den Umstand beeinträchtigt, daß die Proben im Raster-Elektronenmikroskop eine große Zahl von organischen Partikeln enthielten, die lose der jeweiligen Objektoberfläche aufsaßen.

Die nun folgenden Aufnahmen wurden angefertigt, nachdem die Untersuchungsobjekte für 15 Minuten in einen handelsüblichen zahnärztlichen Ultraschallreiniger gegeben worden waren. Die einzige Abweichung vom sonst mit diesen Geräten üblichen Reinigungsverfahren bestand darin, daß an Stelle eines Spezialreinigungsmittelzusatzes reines aqua dest. benutzt wurde.

Der Vergleich der Bilder Nr. 12 und Nr. 13 zeigt augenfällig den starken Reinigungseffekt, den wir mit der Ultraschallbehandlung der Untersuchungsobjekte erzielen konnten.



Nr. 1

Übersicht über das Untersuchungsobjekt

Lage des Untersuchungsobjektes im Unterkiefer

Nr. 2

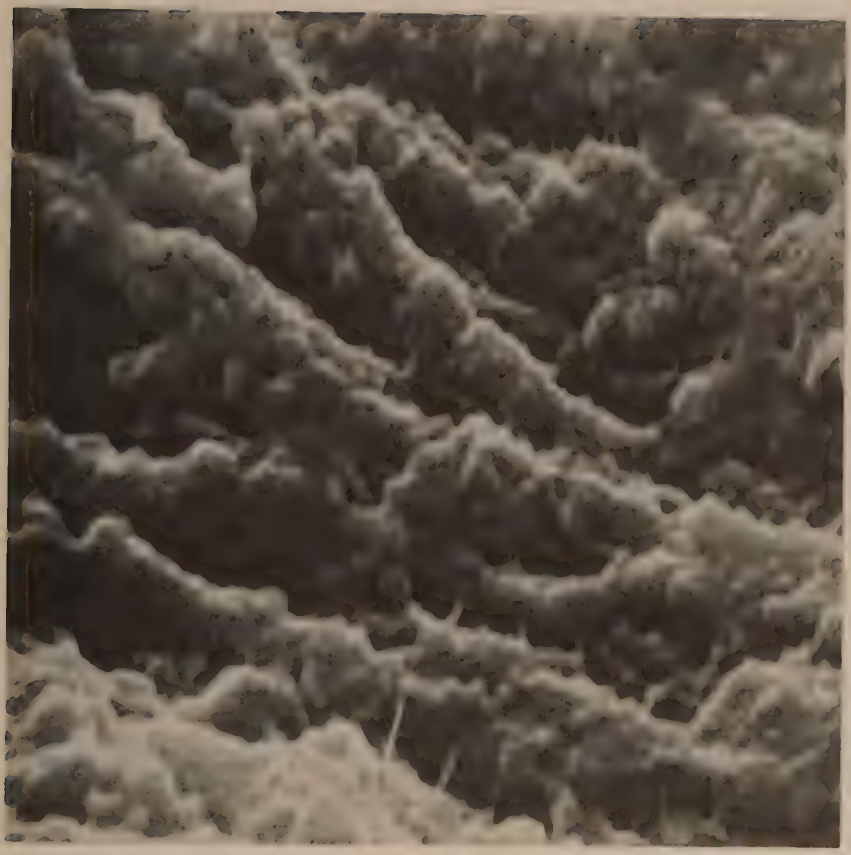
Präparat 3: Bruchfläche des Mandibularkanales in der Aufsicht.
Rechts Lumen des Kanales, links Spongiosa.
Vergrößerung: 1:200

Nr. 3

Präparat 3: Ausschnitt von Bild 2 auf der linken, der Spongiosa zugewandten Seite.
Vergrößerung: 1:1000

Nr. 4

Präparat 3: Ausschnitt von Bild 2, auf der rechten Seite, im Bereich der Innenwand des Mandibularkanales.
Vergrößerung: 1:1000

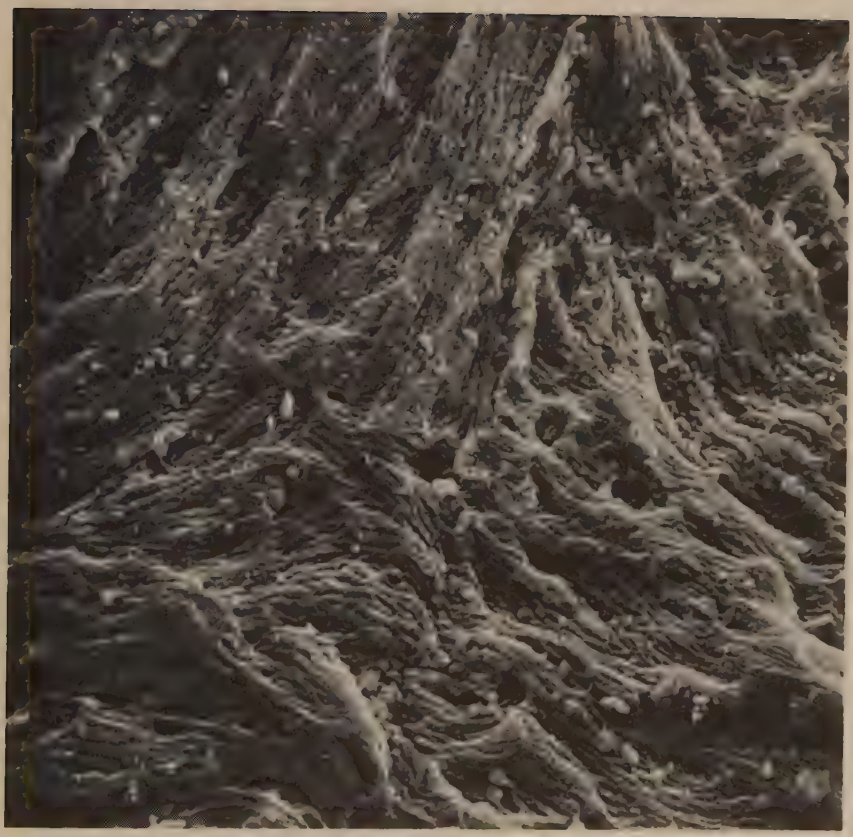


Nr. 5

Präparat 4: Seitliche Wand des Kanaleinganges
Vergrößerung: 1:10 000

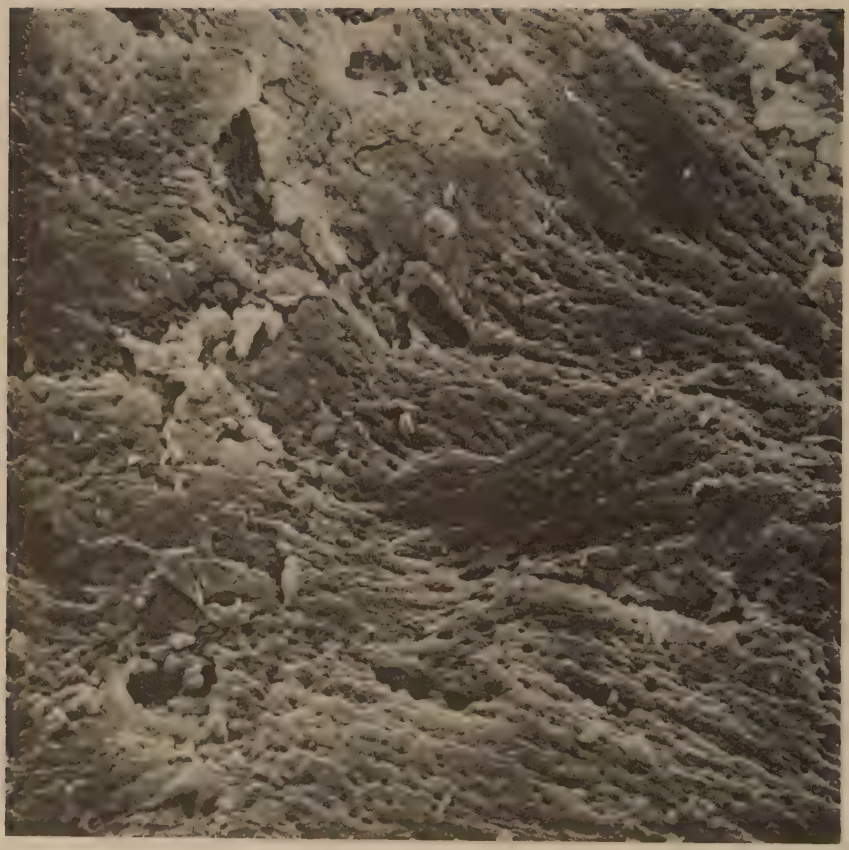
Nr. 6

Präparat 4: Übersicht zu Bild 5
Vergrößerung: 1:2000



Nr. 7

Präparat 4: Übersicht zu Bild 6
Vergrößerung: 1:500

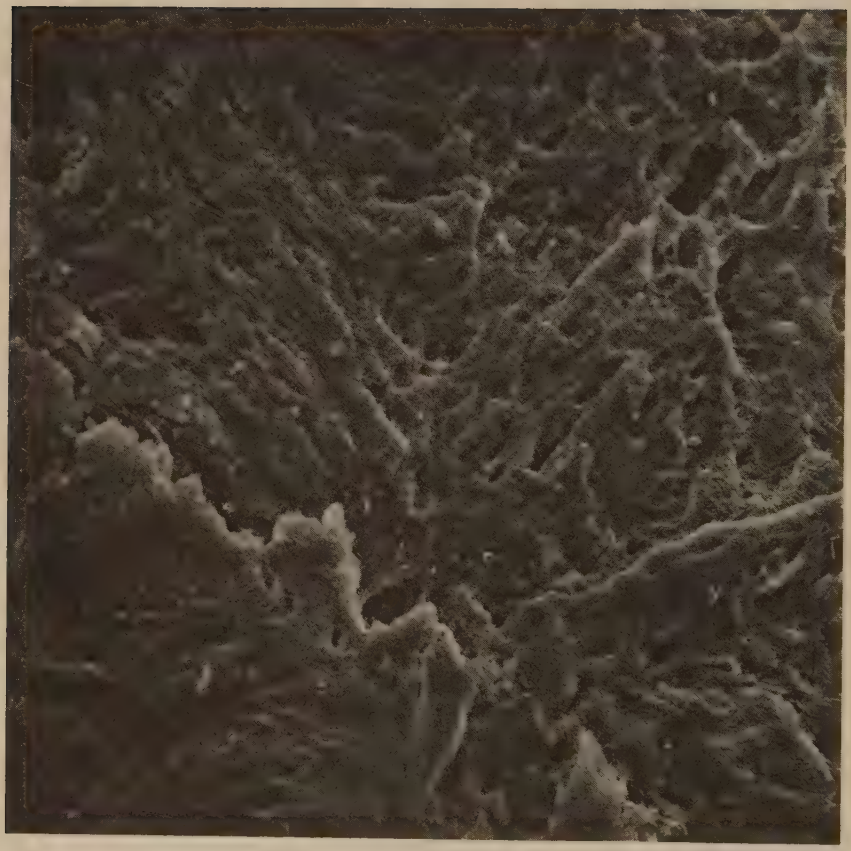


Nr. 8

Präparat 4: Boden des Kanaleinganges. Organische Substanz selektiv aufgelöst.
Vergrößerung: 1:500

Nr. 9

Ausschnitt aus der Bildmitte von Bild 8. Oben ein Volkmannscher Kanal.
Vergrößerung: 1:5000

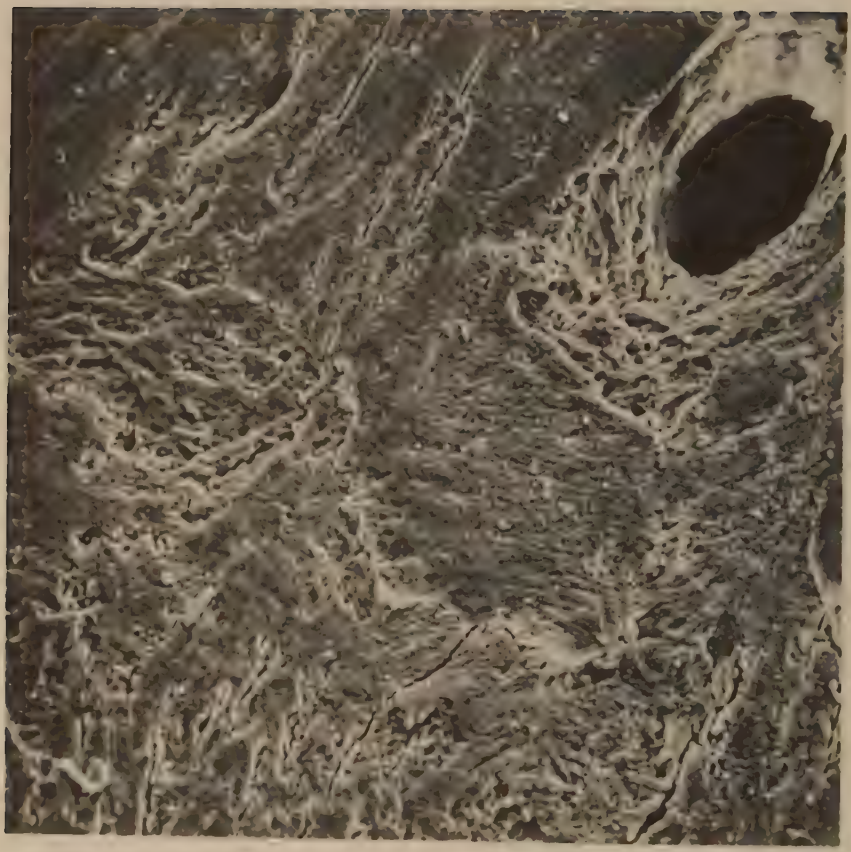


Nr. 10

Aufsicht auf die kompakte Knochensubstanz des Unterkiefers
Vergrößerung: 1:200

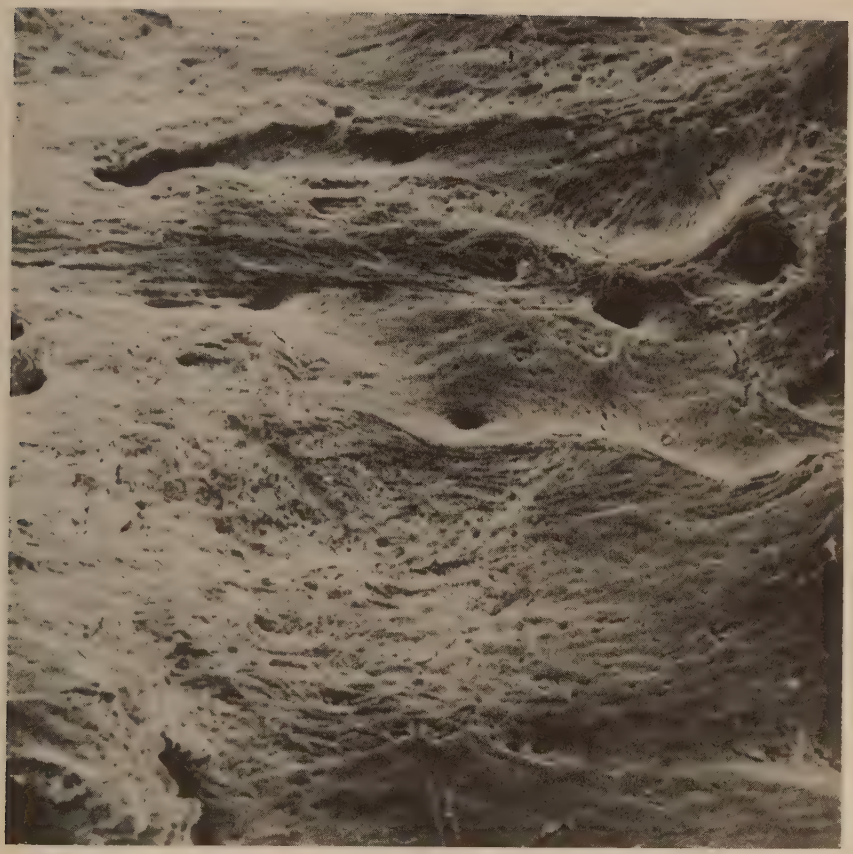
Nr. 11

Knochenoberfläche von organischem Material bedeckt. Links unterhalb der Mitte freie Knochensubstanz.
Vergrößerung: 1:3000



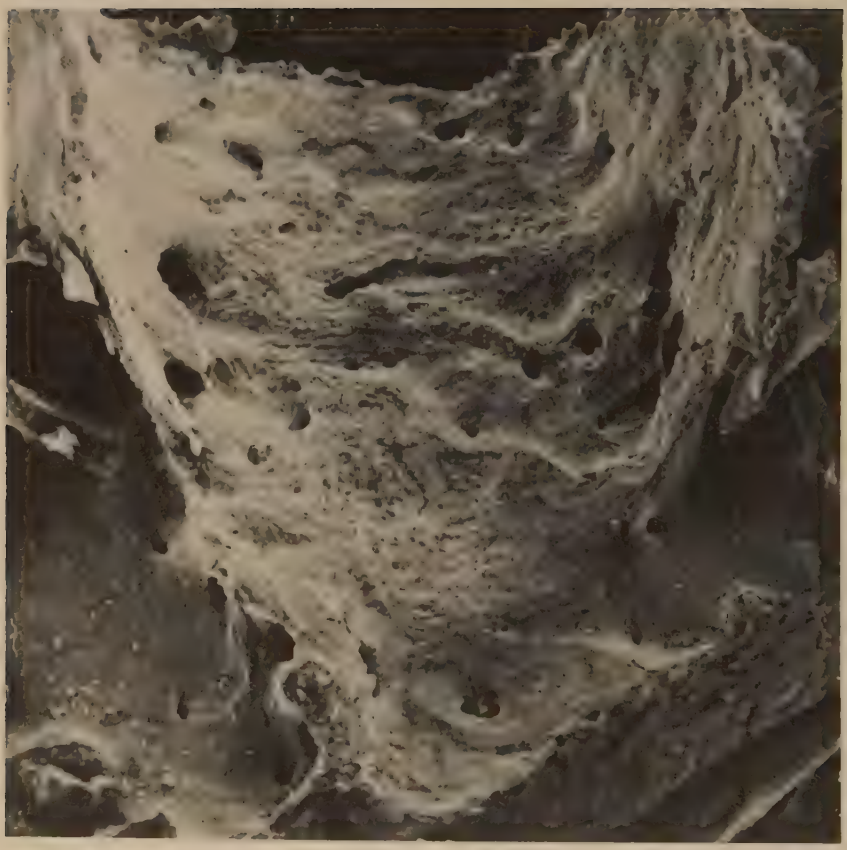
Nr. 12

Übersichtsaufnahme von der hinteren seitlichen Wand des foramen mandibulae. Oberfläche fast völlig mit organischem Material bedeckt.
Vergrößerung: 1:500



Nr. 13

Präparat 3: Obere Kompaktaschicht entfernt, Aufsicht auf die Bodenfläche. Keine organische Kontamination.
Vergrößerung: 1:1000



Nr. 14

Übersicht zu Bild 13. Einblick in den Mandibularkanal in Richtung auf das foramen mandibulae.
Vergrößerung: 1:20

Nr. 15

Ausschnitt vom unteren linken Bildteil von Bild 14.
Aufsicht auf die Bruchfläche der Kanalwand.
Lamellenbau des Knochens.
Vergrößerung: 1:2000

Nr. 16

Ausschnitt vom oberen rechten Teil von Bild 14.
Links unten Lumen des Mandibularkanales. Der Aufblick auf die Bruchfläche der Mandibularkanalwand zeigt eine schollenartige Schichtung der Knochenlamellen.
Vergrößerung: 1:5000

D Schlußbetrachtung

Der Feinbau des Knochens im Bereich des foramen mandibulae eines menschlichen Unterkiefers wurde untersucht. Als Objekt der Untersuchung diente der Unterkiefer einer 68-jährigen Frau, die an einem Abdominaltumor gestorben war.

Die mikroskopischen Bilder wurden mit Hilfe eines Raster-Elektronenmikroskops angefertigt.

Der organische Anteil der Knochensubstanz wurde durch Enzyme verdaut; diese Methode war bislang nicht gebräuchlich. Die Ergebnisse, die damit erzielt wurden, sind zufriedenstellend. Als gewisser Nachteil wird der erforderliche Zeitaufwand empfunden.

Die äußere Gestalt des foramen mandibulae wird geprägt durch die Form und Stärke des nervus alveolaris inferior.

Das Periost im Untersuchungsgebiet ist feiner als am übrigen Unterkiefer und haftet weniger fest auf der Knochenoberfläche. Einige mikroskopische Aufnahmen zeigen, daß die organische Substanz des Knochens von unterschiedlicher Qualität ist. Die selektive Wirkung der verwendeten Enzyme wird deutlich.

Im Bereich der Mulde, die das foramen mandibulae im Unterkiefer bildet, findet man zahlreiche feine Öffnungen, die ebenso innerhalb des Mandibularkanales, wenn auch weniger häufig, vorhanden sind. Diese stellen nach DIECKMANN Kommunikationen mit den umliegenden Markräumen dar.

Die gewonnenen mikroskopischen Aufnahmen zeigen, daß sowohl im Bereich des foramen mandibulae als auch im unmittelbar benachbarten Teil des Mandibularkanales der Knochen eine Kompaktaschicht besitzt. Sie ist allerdings wesentlich dünner als diejenige, die den Unterkiefer umgibt.

Feinste Details der Knochenstruktur sieht man auf einem Bild mit 10 000-facher Vergrößerung. Man erkennt vernetzte Fibrillen, die in Ebenen geordnet verlaufen. Vernetzungen der Ebenen miteinander sind nicht zu erkennen.

Bildausschnitte aus dem Bereich der Wand des foramen mandibulae und aus dem angrenzenden Teil des Mandibularkanales weisen einen lamellenartigen Bau auf. Vergleichbare Strukturen findet man bei Betrachtung der eigentlichen Kompaktaschicht des Unterkiefers.

Durch Studien an pathologisch verändertem Untersuchungsmaterial wird es sicherlich gelingen, noch weitere Aufschlüsse über die Feinstruktur der Knochengrundsubstanz zu gewinnen.

E Anhang

1) foramen mandibulae: diese Bezeichnung wurde dem Reallexikon der Medizin, Seite F 163 entnommen.

2) E. Kellenberger und C. Rouiller, Die Knochenstruktur, untersucht mit dem Elektronenmikroskop, Schweizer. Zeitschr. allg. Path., 13 (1950), Seite 783-788.

3) H. Seiler und F. Lenz, Zur Entstehung des Reliefkontrastes im Elektronen-Emissions- und Raster-Elektronen-Mikroskop, Optik 27 (1968), Seite 438-441.

4) G. Pfefferkorn und R. Blaschke, Der Informationsgehalt rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen, Beitr. elektronenmikroskop. Direktabb. Oberfl., Münster 1,1 (1968).

5) Dr. Ingo-Ernst Richter, Institut für allgemeine und experimentelle Pathologie der Bundeswehr, Mainz.

6) R. Lindenfelser, W. Krönert, H. Orth, Strukturen der Knochenspongiosa, Virchows Archiv, Abt. Zellpath. 5 (1970), Seite 201-208.

7) D. Kammerer, Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen am menschlichen Kiefergelenkkopf, Inaug. Diss., Bonn 1971.

8) B. Leßmeister, Untersuchungen mit dem Raster-Sekundär-Elektronenmikroskop "Stereoscan" am Kieferknochen, Inaug. Diss., Bonn 1970.

9) A. Boyde und M.H. Hobdell, Scanning Electron Microscopy of Lamellar Bone, Z. Zellforsch. 93 (1969), Seite 213-231.

10) H. Becher, K. Hoegen, G. Pfefferkorn, Sublichtmikroskopisch-morphologische Untersuchungen des anorganischen Knochenanteils, Acta Anat. 20 (1954), Seite 105 ff.

11) Sundius, Bygden, Bruce, Ber. Dtsch. karaw. Ges. 17 (1936), Seite 73 ff.

12) W. Lange, Über die Methodik zur Darstellung struktureller Eigenarten im Knochen, Diss. med. fac., Berlin 1933.

13) Dr. Wolfgang Heinrich, in Firma Kalle Ag, Wiesbaden.

14) Siehe oben. Bei den Versuchen dieser Arbeit trat durch Kochen ein Schaden auf, daher Erhitzung nur bis 75 Grad Celsius.

15) Mündliche Angabe von Ingo-Ernst Richter, a.a.O.

16) Mündliche Mitteilung von Dr. Wolfgang Heinrich, a.a.O.

17) Die o.a. Bilder werden in Kapitel C 2) b) eingefügt

18) Dieckmann, cit. nach: Th. Kirsch, Über Lage und Verlauf des nervus mandibularis und die Anlage des Mandibularkanals, DZMK 23 (1955), Seite 36 ff.

19) Th. Kirsch, Über Lage und Verlauf des nervus mandibularis

und die Anlage des Mandibularkanals, DZMK 23 (1955), Seite 36 ff.

20) Professor Dr. Dr. O. Herfert, Direktor der Abteilung für zahnärztliche Chirurgie der Zahn- Mund- und Kieferklinik der Universität Mainz, Röntgenkurs vom 15.2.1975 bis 15.7.1975.

21) Eviguchi, cit. nach: Th. Kirsch, Über Lage und Verlauf des nervus mandibularis und die Anlage des Mandibularkanals, a.a.O., Seite 36 ff.

22) C.H. Fischer, Die Lagebeziehungen der unteren Molaren zum Mandibularkanal aufgrund vergleichender röntgenologischer und histologischer Untersuchungen, Dt. Zahn- Mund- und kieferheilkunde, Band 6, Heft 4, Seite 237-262.

23) Th. Kirsch, Über Lage und Verlauf des nervus mandibularis und die Anlage des Mandibularkanals, a.a.O., Seite 36.

24) V. von Ebner, Über den feineren Bau der Knochensubstanz, Sitz. - Ber. Akad. Wiss., Wien 12 (1875), Seite 49.

25) V. von Ebner, Über den feineren Bau der Knochensubstanz, a.a.O., Seite 38.

26) K. Terrahe, H.-G. Fromme, J. Schulz, P.H. Cassebaum, Rasterelektronenmikroskopische Beobachtungen an gesunden und pathologisch veränderten Gehörknöchelchen, Beiträge elektronenmikroskop. Direktabb. Oberfl. 3 (1970).

27) J.J. Pritchard, General Anatomy and Histology of Bone, in: G.H. Bourne, The Biochemistry and Physiology of Bone, New York, Acad. Press Inc. 1956.

28) K.-H. Knese, Knochenbildung und Entwicklung der Knochenstruktur, Ver. dtsch. Ges. Path. 47, (1963), Seite 35-69.

29) H. Becher, K. Hoegen, G. Pfefferkorn, Sublichtmikroskopisch-morphologische Untersuchungen des anorganischen Knochenanteils, Acta Anat. 20 (1954), Seite 105 ff.

F Literaturverzeichnis

W. Bargmann, Histologie und mikroskopische Anatomie des Menschen, Stuttgart 1967.

H. Becher, K. Hoegen, G. Pfefferkorn, Sublichtmikroskopisch-morphologische Untersuchungen des anorganischen Knochenanteils, Acta Anat. 20 (1954).

H.G. Boenninghaus, V. Becker, Oberflächenuntersuchungen am Osteoskleroseknochen mit dem Elektronenmikroskop "Stereoskan", Archiv klin. exper. Ohren- Nasen- und Kehlkopfheilk. 190 (1968).

A. Boyde, M.H. Hobdell, Scanning Electron Microscopy of Lamellar Bone, Z. Zellforsch. 93 (1969).

V. von Ebner, Untersuchungen über das Verhalten des Knochengewebes im polarisierten Licht, Sitz. - Ber. Akad. Wiss., Wien 70 (1874).

V. von Ebner, Über den feineren Bau der Knochen, Sitz. - Ber. Akad. Wiss., Wien 12 (1875).

J. Engel, Über die Gesetze der Knochenentwicklung, Sitz. - Ber. der Wiener Academie der Wissenschaften VII Band, Wien 1851.

C. H. Fischer, Die Lagebeziehung der unteren Molaren zum Man-

dibularkanal aufgrund vergleichender röntgenologischer und histologischer Untersuchungen, DZMK 6 (1939).

W. Gebhardt, Über funktionell wichtige Anordnungsweisen der feineren und gröberen Bauelemente des Wirbeltierknochens, II. Teil, Arch. f. Entw.-Mech. 20, Leipzig 1906.

W. Gebhardt, Der Bau der Haversschen Lamellensysteme und seine funktionelle Bedeutung, Arch. f. Entw.-Mech. Org. 20, Leipzig 1906.

Gegenbaur, Über die Bildung des Knochengewebes, Mitt. Jen. Ztschr. f. Med. Naturwiss. 1 (1864), 3 (1967).

Goetzen, Der innere Bau des Alveolarfortsatzes des menschlichen Unterkiefers in Korrosionsforschungen, DZZ 19 (1964).

K.M. Heuler, Besteht eine Korrelation zwischen Alter und Knochenstruktur?, Ztschr. f Zellf. u. mikr. Anat. 7 (1928).

H. Huber, Möglichkeiten zur Verminderung elektronischer Aufladungen von Präparaten für das Elektronen-Raster-Mikroskop mit Hilfe von Antistatika, Beitr. elektronenmikroskop. Direktabb. Oberfl., Münster 1 (1968).

J.G. Helmcke, Abbildung nichtleitender organischer Strukturen, Beitr. elektronenmikroskop. Direktabb. Oberfl., Münster 3 (1970).

H.L. Jaffe, The Structure of Bone, Arch. Surg., 19 (1929).

A. Katz, Architektur des Unterkiefers im Zusammenhang mit der

Lage der Wurzeln und der Widerstandsfähigkeit des Zahnbogens bei Erwachsenen, Vierteljahreszeitschr. Zahnheilk., 47 (1931).

E. Kellenberger, C. Rouiller, Die Knochenstruktur, untersucht mit dem Elektronen-Mikroskop, Schweiz. Z. allg. Path. 13 (1950).

Th. Kirsch, Über Lage und Verlauf des nervus mandibularis und die Anlage des Mandibularkanals, DZMK 23 (1955).

K.-H. Knese, Knochenbildung und Entwicklung der Knochenstruktur, Ver. dtsch. Ges. Path., 47 (1963).

A. Köllicker, Der feinere Bau des Knochengewebes, Z. Zool., 44 (1886).

H. Koltze, Studie zur äußeren Form der Osteone, Z. Anat., 115 (1951).

D. Kammerer, Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen am menschlichen Kiefergelenkkopf, Inaug. Diss., Bonn 1971.

W. Lange, Über die Methodik zur Darstellung struktureller Eigenarten im Knochen, Diss. Med. Fac., Berlin 1933.

E. Lautenbach, Osteosklerosen der Kiefer unter Berücksichtigung des Raster-Aufstrahlungs-Elektronenmikroskops, Dt. Zahn- Mund- und Kieferheilk., 53 (1969).

B. Leßmeister, Untersuchungen mit dem Raster-Sekundär-Elektronenmikroskop "Stereoskan" am Kieferknochen, Inaug. Diss., Bonn 1970.

R. Lindenfelser, W. Krönert, H. Orth, Strukturen der Knochenspongiosa, Virchows Arch., Abt. B, Zellpath., 5 (1970).

H. von Meyer, Die Architektur der Spongiosa, Arch. f. Anat. u. Phys., 615 (1867).

K.D. Mörike, F. Kiss, J. Szentágothai, Lehrbuch und Atlas der makroskopischen Anatomie für Zahnärzte, Stuttgart 1969.

H. Petersen, Die Organe des Skelettsystems, in: Handbuch der mikroskop. Anat. des Menschen, Band II, 3 (1930).

G. Pfefferkorn, K. Schur, Oberflächenabbildung im Photo-Elektronen-Emissions-Mikroskop und im Raster-Elektronenmikroskop; ein erster Vergleich, Beitr. elektronenmikroskop. Direktabb. Oberfl., 3 (1970).

G. Pfefferkorn, R. Blaschke, Der Informationsgehalt raster-elektronenmikroskopischer Aufnahmen, Beitr. elektronenmikroskop. Direktabb. Oberfl., 1 (1968).

J.J. Pritchard, General Anatomy and Histology of Bone, in: G.H. Bourne, The Biochemistry and Histology of Bone, New York, 1956, Academic Press Inc.

H. Reumuth, Leistungs- und Prinzipvergleiche zwischen Lichtmikroskopen und dem neuen Raster-Aufstrahlungs-Elektronenmikroskop Stereoscan 1966, Melliand Textilber., 48 (1967), Nr. 5.

H. Reumuth, V. Becker, "Stereoscan", ein neues Elektronenmikroskop. Erste anatomische Bilder. Zugleich ein Beitrag zur Blutge-

fäßwand-Beziehung, Klin. Wochenschrift, 46 (1968), Nr. 2.

I.-E. Richter, Raster-Elektronenmikroskopie bei der Untersuchung von Knochenfeinstrukturen, Materia Medica Nordmark, 23 (1971).

I.-E. Richter, H. Huber, Biologische Mikrostrukturen räumlich gesehen, Naturwiss. u. Medizin, 5 (1968), Nr. 21, 44.

I.-E. Richter, Die Darstellung von Erythrocyten in Abhängigkeit von der Präparationsmethode, Beiträge elektronenmikroskop. Direktabb. Oberfl., 2 (1969).

W. Roux, Gesammelte Abhandlungen über Entwicklungsmechanik der Organismen, Band 1, Leipzig 1895.

W. Roux, Beitrag zur Morphologie der funktionellen Anpassung: Beitr. III: Beschreibung und Erläuterung einer knöchernen Kniegelenksankylose, 1885.

W. Roux, Kritisches Referat über das Gesetz der Transformat. der Knochen, 1893.

E.B. Ruth, Bone Studies:
Fibrillar Structure of Adult Human Bone, Amer. J. Anat., 80 (1947).

H. Schmidt, Verkalkungsstudie am entmineralisierten Zahn- und Knochengewebe, Nova Acta Leopoldina, Leipzig 1967.

H. Seiler und F. Lenz, Zur Entstehung des Reliefkontrastes ausgedehnter Flächen im Elektronenemissionsmikroskop und Raster-

Elektronenmikroskop, Optik 27 (1968).

Sobotta, Becher, Atlas der deskriptiven Anatomie des Menschen, Fünfzehnte Auflage, München-Berlin 1957.

B. Solger, Über die Architektur der Stützsubstanzen, Leipzig 1892.

B. Solger,Der gegenwärtige Stand der Lehre von der Knochenarchitektur. Untersuchungen zur Naturlehre des Menschen und der Tiere, Band 16, Gießen 1899.

Sundius, Bygden, Bruce, Ber. Dtsch. karaw. Ges., 17 (1936).

K. Terrahe, H.G. Fromme, J. Schulz, Raster-elektronenmikroskopische Beobachtungen an gesunden und pathologisch veränderten Gehörknöchelchen, Beitr. elektronenmikroskop. Direktabb. Oberfl., 3 (1970).

H. Triepel, Die trajaktoriellen Strukturen, Wiesbaden 1908.

H. Triepel, Die Architektur der Knochenspongiosa in neuerer Auffassung, Ztsch. Konsti G. Lehre, 8 (1922).

A. Waldeyer, Anatomie des Menschen, Berlin 1969 (6. Auflage).

M. Watzka, Kurzlehrbuch der Histologie und mikroskopischen Anatomie des Menschen, Stuttgart (4. Auflage) 1969.

F. Weidenreich, Das Knochengewebe, in: Handbuch mikr. Anatomie

des Menschen, Band 2, Berlin 1930.

H. Wolf, Die Durchtrennung des Unterkiefers mit Erhaltung des Gefäß-Nerven-Bündels, DZMK, 9 (1942).

J. Wolff, Das Gesetz der Transformation der Knochen, Gr. Folio XIII, Berlin 1892.

J. Wolff, Über die Bedeutung der Architektur der spongiösen Substanz, Centralblatt für die medizin. Wissenschaften Nr. 54 (1969).

J. Wolff, Über die innere Architektur der Knochen etc., Virchows Archiv, Band 50 (1870).

Herrn Professor Dr. Dr. Lautenbach danke ich für die Überlassung des Themas, besonders herzlich für die großzügige und wertvolle Unterstützung, die er mir sowohl bei der Durchführung als auch bei der Fertigstellung der Arbeit zukommen ließ.

Herrn Professor Dr. Schmuth danke ich herzlich für die freundliche Übernahme des Korreferates.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Wolfgang Heinrich aus Wiesbaden, der es mir durch seine Beratung und Hilfe ermöglicht hat, die enzymatische Bearbeitung der Untersuchungsobjekte durchzuführen.

Nicht minderen Dank schulde ich Herrn Dr. Ingo-Ernst Richter vom Institut für allgemeine und experimentelle Pathologie der Bundeswehr in Mainz. Er stand mir bei der Erstellung der raster-elektronenmikroskopischen Aufnahmen mit seiner großen Erfahrung und seiner tatkräftigen Hilfe zur Seite.

Das Mikroskop, auf dem die Aufnahmen angefertigt wurden, wurde aus Mitteln der Stiftung Volkswagenwerk beschafft.

G Lebenslauf

Am 5.3.1948 wurde ich, Karl-Ludwig Sattler, als Sohn des Zahnarztes Rudolf Sattler und seiner Ehefrau Johanna, geborene Feuchter in Mannheim geboren. Hier besuchte ich von 1954 bis 1958 die Volksschule. Vom Jahre 1958 an war ich Schüler des humanistischen Karl-Friedrich-Gymnasiums in Mannheim, an dem ich am 12.10.1966 die Reifeprüfung ablegte.

Während des Wintersemesters 1966/67 studierte ich Biologie an der Universität Heidelberg.

Von April 1967 bis Oktober 1968 habe ich im Sanitätsdienst der Luftwaffe den Wehrdienst abgeleistet. Anschließend begann ich eine Lehre als Zahntechniker in einem Laboratorium in Mannheim.

Zum Sommersemester 1969 erhielt ich einen Studienplatz für Zahnmedizin an der Johannes-Gutenberg-Universität in Mainz. Dort legte ich am 22.5.1974 das zahnärztliche Staatsexamen ab.

Von Juni 1974 bis Mai 1975 war ich als Assistent in der Praxis meines Vaters tätig. Seit 1.6.1975 bin ich Assistent an der Zahn-Mund- und Kieferklinik der Städtischen Krankenanstalten Karlsruhe.